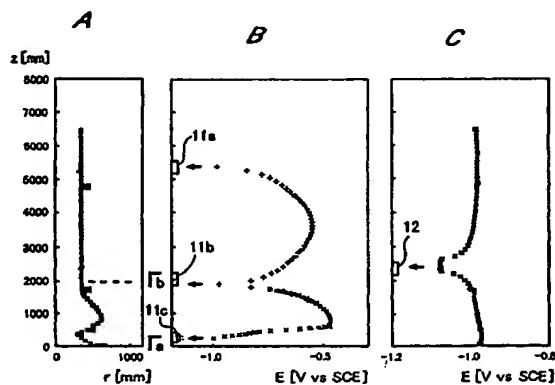




(51) 国際特許分類6 G01N 27/26	A1	(11) 国際公開番号 WO00/19188  (43) 国際公開日 2000年4月6日(06.04.00)
(21) 国際出願番号 PCT/JP99/05110  (22) 国際出願日 1999年9月20日(20.09.99)  (30) 優先権データ 特願平10/279191 1998年9月30日(30.09.98) JP  (71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について) 株式会社 荏原製作所(EBARA CORPORATION)[JP/JP] 〒144-8510 東京都大田区羽田旭町11番1号 Tokyo, (JP)  (72) 発明者 ; および  (75) 発明者 / 出願人 (米国についてのみ) 宮坂松甫(MIYASAKA, Matsuho)[JP/JP] 〒251-8502 神奈川県藤沢市本藤沢4丁目2番1号 株式会社 荏原総合研究所内 Kanagawa, (JP) 高山博和(TAKAYAMA, Hirokazu)[JP/JP] 〒144-8510 東京都大田区羽田旭町11番1号 株式会社 荏原製作所内 Tokyo, (JP) 天谷賢治(AMAYA, Kenji)[JP/JP] 〒211-0001 神奈川県川崎市中原区上丸子八幡町786 メゾン吉棟202 Kanagawa, (JP) 青木 繁(AOKI, Shigeru)[JP/JP] 〒241-0801 神奈川県横浜市旭区若葉台2-4-302 Kanagawa, (JP)	(74) 代理人 渡邊 勇, 外(WATANABE, Isamu et al.) 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7丁目5番8号 GOWA西新宿4階 Tokyo, (JP)  (81) 指定国 CN, US, 欧州特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE)  添付公開書類 国際調査報告書	

(54) Title: CORROSION/ANTICORROSION ANALYSIS METHOD

(54) 発明の名称 腐食・防食解析方法



## (57) Abstract

A corrosion/anticorrosion analysis method used when at least two continuous identical or different areas exist among areas to be modeled two-dimensionally, three-dimensionally or axial-symmetrically. Element division suitable for each modeling is effected by dividing the entire object into areas to define one area as an attentional area and the others as non-attentional areas. A division surface is common to two areas and current densities and potentials are mutually equivalent on individual elements having matching positions on the division surface. A discretized boundary integral equation in a non-attentional area is modified to express an unknown relation between a current density and a potential on a division surface by summarizing known relations between current densities and potentials on elements in non-attentional areas outside the division surface. A boundary element analysis for an attentional area is made using the obtained relation between a current density and a potential on the division surface as a boundary condition to determine a potential distribution and a current density distribution in the entire attentional area. Then, a boundary element analysis for non-attentional areas is made using the obtained potential and current density on the division surface as a boundary condition to complete an analysis for the areas as a whole.

本発明は、2次元、3次元、および軸対象としてモデル化される領域の内、同一あるいは異なる領域が二つ以上連続して存在する場合の腐食・防食解析方法を提供する。

全体を領域に分割してそれぞれのモデル化に応じた要素分割を行い、それらの内の一領域を注目領域、他を非注目領域とする。分割面は二つの領域に対して共通であるが、分割面上の位置が一致する各要素上においては、電流密度および電位は互いに等価である。非注目領域の離散化した境界積分方程式を変形し、未知である分割面上の電流密度と電位の関係を分割面以外の非注目領域の要素上の既知である電流密度と電位の関係を集約することにより表す。得られた分割面上の電流密度と電位の関係を境界条件として、注目領域の境界要素解析を行い、注目領域全体の電位及び電流密度分布を求める。次に、得られた分割面上の電位又は電流密度を境界条件として非注目領域の境界要素解析を再び行うことにより領域全体の解析を行う。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード(参考情報)

AE アラブ首長国連邦  
AL アルバニア  
AM アルメニア  
AT オーストラリア  
AU オーストラリア  
AZ アゼルバイジャン  
BA ボスニア・ヘルツェゴビナ  
BB バルバドス  
BE ベルギー  
BF ブルキナ・ファソ  
BG ブルガリア  
BJ ベナン  
BR ブラジル  
BY ベラルーシ  
CA カナダ  
CF 中央アフリカ  
CG コンゴ  
CH スイス  
CI コートジボアール  
CM カメルーン  
CN 中国  
CR コスタ・リカ  
CU キューバ  
CY キプロス  
CZ チェッコ  
DE ドイツ  
DK デンマーク

DM ドミニカ  
EE エストニア  
ES スペイン  
FI フィンランド  
FR フランス  
GA ガボン  
GB 英国  
GD グレナダ  
GE グルジア  
GH ガーナ  
GM ガンビア  
GN ギニア  
GW ギニア・ビサウ  
GR ギリシャ  
HR クロアチア  
HU ハンガリー  
ID インドネシア  
IE アイルランド  
IL イスラエル  
IN インド  
IS アイスランド  
IT イタリア  
JP 日本  
KE ケニア  
KG キルギスタン  
KP 北朝鮮  
KR 韓国

KZ カザフスタン  
LC セントルシア  
LI セリヒテンシュタイン  
LK スリ・ランカ  
LR リベリア  
LS レソト  
LT リトアニア  
LU ルクセンブルグ  
LV ラトヴィア  
MA モロッコ  
MC モナコ  
MD モルドヴァ  
MG マダガスカル  
MK マケドニア旧ユーゴスラヴィア共和国  
ML マリ  
MN モンゴル  
MR モーリタニア  
MW マラウイ  
MX メキシコ  
NE ニジェール  
NL オランダ  
NO ノールウェー  
NZ ニュージーランド  
PL ポーランド  
PT ポルトガル  
RO ルーマニア

RU ロシア  
SD スーダン  
SE スウェーデン  
SG シンガポール  
SI スロベニア  
SK スロヴァキア  
SL シエラ・レオネ  
SN セネガル  
SZ スワジランド  
TD チャード  
TG トーゴ  
TJ タジキスタン  
TZ タンザニア  
TM トルクメニスタン  
TR トルコ  
TT トリニダード・トバゴ  
UG ウグアンダ  
UA ウクライナ  
US 米国  
UZ ウズベキスタン  
VN ヴイエトナム  
YU ユーゴスラビア  
ZA 南アフリカ共和国  
ZW ジンバブエ

## 明 細 書

## 腐食・防食解析方法

## 技術分野

本発明は、腐食・防食の予測を行うためのコンピュータを用いた解析方法に関するものである。特に、金属の腐食・防食問題の内、異種金属接触腐食（ガルバニック腐食とも呼ぶ）および通気差腐食のようなマクロセル腐食（カソード防食）の問題に対して好適な解析方法を提供するものである。また、金属の腐食・防食問題以外にも、メッキ、電池、電解槽など、マクロ的なアノードとカソードが電解質を介して存在し、電位場を形成する系に対しても同様に適用可能である。

## 背景技術

海水のような高い電気伝導度を持つ溶液中では、異種金属材料を混用することによって生じる異種金属接触腐食、あるいは流速分布の不均一性に起因する流速差腐食（流速差に起因する通気差腐食）などのマクロセル腐食の被害を受けやすい。従って、これらの腐食を事前に正確に予測し、対策を施すことが望まれている。一方、マクロセルにおけるカソード側の腐食抑制現象を積極的に利用した「カソード防食」は、最も基本的な防食方法として広く採用されており、陽極の材料および設置位置、防食対象機器の形状、材料構成および溶液条件（電気伝導度、流速など）に応じて、防食範囲および犠牲陽極の消耗速度などを予測することが要求されている。

マクロセルの予測に対して実験的なアプローチに限界がある理由は、マクロセルの挙動に対して場の形状の影響が大きいからである。つまり、例えば、異種金属接触腐食に関する実験を行い、面積比、材料の組み合わせ、溶液の電気伝導度など各種因子の影響を詳細に調べたとしても、その結果は、その実験における溶液の占める領域の3次元形状にだけ当てはまるものだからである。実際の機器および構造物では形状が複雑であるため、マクロセルにおける液間抵抗を正確に見積もることができず、実験結果をそのまま適用することは困難となる。また、防食対象機器の形状が変わるごとにその形状を想定した実験を行うことは実際上不可能である。

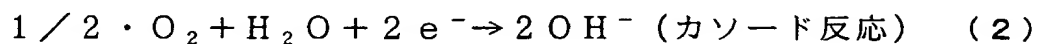
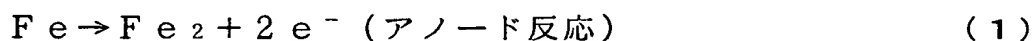
従って、実構造物でのマクロセル腐食およびカソード防食の予測は、多くの場合経験則に頼らざるを得なかったのが実情である。そこで、より正確で定量的な予測を行うため、多くの試みがなされてきた。まず、電位分布を支配するラプラス方程式を純数学的に解くことによって電位および電流密度分布を求める試みがなされた。しかし、これらの解析対象はいずれも平板、円筒などの比較的単純な系に限られている。電場問題を解析する手法として等角写像法および電導紙を用いた方法が古くから採用されているが、これらの方法はいずれも二次元場しか扱うことができない。

一方、近年のコンピューター技術の発展に伴い、差分法、有限要素法および境界要素法を利用した数値解析を適用する試みが盛んに行われるようになった。差分法や有限要素法では物体全体を要素分割しなければならないため、計算時間が膨大になる欠点がある。これに対し、境界要素法は物体表面の要素分割だけしか必要としないため、要素分割と計算

に要する時間を大幅に短縮することが可能である。電位および電流密度のような表面における物理量が重要となる腐食問題を解析するには境界要素法が最も適した方法であると考え、発明者らはマクロセル腐食およびカソード防食問題の予測のため、境界要素法を適用した解析技術の開発を行った。

[基礎方程式と境界条件]

水溶液中における金属の腐食はアノード反応とカソード反応を対とする電気化学的な反応によって進行する。海水のような、溶存酸素を含む中性塩水溶液中での鉄の腐食を例にとると、反応は式(1)および(2)のように進行する。



金属表面で、アノード反応が起こっている箇所をアノード、カソード反応が起こっている箇所をカソードと呼ぶ。海水中における鉄の腐食の場合では、通常アノードとカソードは微小で互いに混在しており、その位置も一定しない。従って、腐食は多少の凹凸を伴いながらも全体にほぼ均一に進行する。ところが、材料、表面状態、環境などが均一でない場合にはアノードとカソードとが偏在し、特定の箇所(アノード部)に腐食が集中するようになる。前者はミクロセル腐食(但しセルは電池を意味する)、後者はマクロセル腐食と呼んで区別されるが、海水ポンプにおいてしばしば大きな被害をもたらすのは、主に異種金属接触腐食、通気差腐食などのマクロセル腐食である。一方、マクロセル腐食におけるカソード側はもっぱらカソード電流が流れるため腐食が抑制されるが、この腐食抑制現象を積極的に利用した防食法がカソード防食である。

マクロセル腐食およびカソード防食のいずれかの系も、アノードおよびカソードが電解質を介して構成する電池と考えることができる。電解質内の電位 ( $\phi$ ) は式 (3) のラプラス方程式に支配される。

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (3)$$

図1のように、電解質が境界  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_{3a}$  および  $\Gamma_{3c}$  に囲まれているとする。ここで  $\Gamma_1$  は電位  $\phi$  の値が  $\phi_0$  に固定された境界 (電位一定の境界)、 $\Gamma_2$  は電流密度  $q$  の値が  $q_0$  に固定された境界 (電流密度一定の境界)、 $\Gamma_{3a}$  および  $\Gamma_{3c}$  はそれぞれアノードおよびカソードの表面である。

各境界における境界条件は次式で与えられる。

$$\Gamma_1 \text{ 上: } \Phi = \Phi_0 \quad (4)$$

$$\Gamma_2 \text{ 上: } q \{ \equiv K \partial \Phi / \partial n \} = q_0 \quad (5)$$

$$\Gamma_{3a} \text{ 上: } \Phi = -f_a(q) \quad (6)$$

$$\Gamma_{3c} \text{ 上: } \Phi = -f_c(q) \quad (7)$$

ここで、 $\kappa$  は電解質の電気伝導度、 $\partial / \partial n$  は外向き法線方向の微分であり、 $f_a(q)$  および  $f_c(q)$  はアノードおよびカソードの分極特性を表す非線形の関数で、実験によって求められる。式 (3) を境界条件である式 (4) ~ (7) のもとで解けば、表面近傍の電位および電流密度分布を求めることができる。この電位  $\phi$  と我々が実際に測定する電極電位  $E$  は、 $\phi = -E$  の関係がある。

#### [境界要素法による解法]

境界要素法の通常の定式化に伴い、式 (3) より境界積分方程式が導かれる。

$$ck\phi = \int_{\Gamma} \phi^* q d\Gamma - \int_{\Gamma} \phi q^* d\Gamma \quad (8)$$

ここで、 $\phi^*$  は 3 次元ラプラス方程式の基本解であり、 $q^* = \kappa \partial \phi^* / \partial n$  である。 $\Gamma$  は電解質を囲む境界 ( $= \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_{3a} + \Gamma_{3c}$ ) を示す。また、 $c$  は滑らかな境界では  $c = 1/2$ 、角度  $\omega$  の角点では  $c = \omega / 2\pi$  である。

この境界積分方程式を数値的に解くためには離散化を行う必要があり、境界を多くの要素に分割し、 $\phi$  と  $q$  をそれぞれの節点における離散的な値と内挿関数とにより近似すると次の連立代数方程式が導かれる。

$$[A] \begin{Bmatrix} x_j \\ q_j \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} b_j \\ f_j(q_j) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $b_j$  ( $j = 1, 2 \dots p$ ) は  $\Gamma_1 + \Gamma_2$  上の  $\phi$  または  $q$  の既知の成分の値、 $x_j$  ( $j = 1, 2 \dots p$ ) は  $b_j$  に対応する未知量である。 $f_j(q_j)$  ( $j = 1, 2 \dots s$ ) は分極特性を表す非線形の関数である。 $p$  および  $s$  は境界  $\Gamma_1 + \Gamma_2$  および  $\Gamma_{3a} + \Gamma_{3c}$  上の要素数を示している。また、 $[A]$  および  $[B]$  は境界  $\Gamma$  の幾何学的形状によって決まるマトリックスである。この式は非線形であるため、これを解くためには繰り返し計算を必要とする。本発明者はニュートン・ラフソン法を採用している。

#### [軸対象領域の解析法]

実際の機器の中には、パイプあるいはポンプ部品の一部のように、軸対称の領域を含むものが多く、これらの領域の解析をより簡便に行うこ

とが望まれている。軸対称問題を解く方法として主に次の二つが考えられる。すなわち、(i) 軸対称問題に対する基本解を利用する方法、および(ii) 三次元問題に対する通常の基本解を用い、離散化時に軸対称性を考慮して要素数を削減する方法である。軸対称条件を満足する基本解を利用すると、通常の基本解を利用する場合と比べて積分計算が複雑になる問題がある。そこで、本プログラムでは、離散化時に軸対称性を考慮して要素数を削減する方法を採用した。以下にこの手法について説明する。

通常の三次元解析においては、式(8)の境界積分方程式を離散化するためには、すべての境界を要素分割する必要がある。ところが、軸対称性により $\phi$ および $q$ は周方向に同一の値を持つので、式(8)は以下のように変形することができる。

$$kc\phi = \int_{\Gamma_D} \left( q \int_0^{2\pi} r \phi^* d\theta - \phi \int_0^{2\pi} r q^* d\theta \right) d\Gamma \quad (10)$$

ここで、 $\Gamma_D$ は一次元の線上の範囲を示す。式(10)からは $\Gamma_D$ のみ離散化するだけで連立代数方程式を得ることができる。従って、このように軸対称性を利用すれば未知数の数を大幅に減らすことができ、さらに精度の向上も期待できる。

#### 「領域分割法」

簡単のために、図2に示すような2つの部分からなる領域を考える。内部境界面を $\Gamma_B$ とすると、それぞれの領域において式(9)がなりたつので次式が得られる。



## 領域 I

$$\left[ A^I G^{IB} \right] \begin{Bmatrix} X^I \\ q^{IB} \end{Bmatrix} = \left[ B^I H^{IB} \right] \begin{Bmatrix} b^I \\ \phi^{IB} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

## 領域 II

$$\left[ A^{II} G^{IIB} \right] \begin{Bmatrix} X^{II} \\ q^{IIB} \end{Bmatrix} = \left[ B^{II} H^{IIB} \right] \begin{Bmatrix} b^{II} \\ \phi^{IIB} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここで、添え字 I、II はそれぞれ領域 I、II に関する量を表し、添え字 B は内部境界面  $\Gamma_B$  に関する量を表す。 $\{X^M\}$  ( $M = I, II$ ) は  $x_i$  および  $q_i$  の内、 $\Gamma_B$  以外の境界に関する量を成分とするベクトルであり、 $\{b^M\}$  ( $M = I, II$ ) は  $X^M$  に対応する既知量（または分極曲線を表す関数）を成分とするベクトルである。

ところで、内部境界では電位および電流密度に連続性があるので、次式が成り立つ。

$$\phi^{IB} = \phi^{IIB} \quad (13)$$

$$q^{IB} = -q^{IIB} \quad (14)$$

式 (11) および (12) において、右辺の  $[H^{MB}] \{ \phi^{MB} \}$  ( $M = I, II$ ) を左辺に移項し、式 (13) および (14) を代入すると次式が得られる。

$$\left[ A^I G^{IB} - H^{IB} \right] \begin{Bmatrix} X^I \\ q^{IB} \\ \phi^{IB} \end{Bmatrix} = \left[ B^I \right] \{ b^I \} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -G^{IB} - H^{IB} A^I \\ \phi^{IB} \\ X^I \end{bmatrix} = [B^I] \begin{Bmatrix} q^{IB} \\ b^I \end{Bmatrix} \quad (16)$$

これらをまとめると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} A^I G^{IB} - H^{IB} & 0 \\ 0 & -G^{IB} - H^{IB} A^I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X^I \\ q^{IB} \\ \phi^{IB} \\ X^I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B^I & 0 \\ 0 & B^I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} b^I \\ b^I \end{Bmatrix} \quad (17)$$

この方程式は式(9)と同様、非線形方程式を構成している。

上述したように、発明者らはこれまで、2次元、3次元および軸対称のそれぞれに対して、開領域（船舶外面のように無限遠方まで広がる電解質に囲まれた場合）および閉領域（ポンプ内面のように電解質が囲われている場合）を解析する6種類のプログラムを開発し、実用的な腐食・防食問題の解決に当たってきた。

ところで、実際の系では、2次元（開領域および閉領域）、3次元（開領域および閉領域）、および軸対称（開領域および閉領域）でモデル化できる6種類の領域の内、いくつかが連続して存在する場合がある。図3に具体的な事例を示す。これはステンレス鋼製の海水ポンプで、ポンプ内面の3箇所にZn犠牲陽極が円周状に配置され、ポンプ外面には角柱状のZn犠牲陽極が4本等配で置かれている。ポンプ内外面は海水を介して導通しており、ポンプ内面は外面に対して、ポンプ外面は内面に

対してそれぞれ電気化学的に影響を及ぼすはずである。

しかしながら、ポンプ外面を囲む海水は広い領域を占めていて、閉領域として扱うには要素分割のための境界が大きすぎるため、ポンプ内面と同じ3次元閉領域でモデル化し同時に解析することは事実上不可能である。そこで、ポンプ内面を3次元閉領域解析を行い、ポンプ外面は開領域解析を行うこととする。ガイドケーシング内面は7枚の螺旋形状のガイドベーンによって7つの流路に仕切られている。これらは互いに対称であるため、その内一つを取り出して3次元要素分割を行うこととする。また、ポンプ外面の角柱状の陽極は同じ面積の帯状の陽極がポンプ外面に取り付けられていると仮定して軸対称として扱い、開領域軸対称モデルとして扱う。

実際は前述のようにポンプ内外面は電気化学的に影響を及ぼし合っているため、それを考慮した解析が必要であるが、それぞれの領域を扱う解析プログラムが異なるため（ポンプ内面：3次元閉領域プログラム、ポンプ外面：軸対称開領域プログラム）、互いの影響を考慮した解析を行うことは従来不可能であった。上述したように、発明者らは領域分割法を開発しているが、この方法においては同一のモデル化による領域の解析しか行うことができなかった。

#### 発明の開示

本発明は、上述した事情に鑑みて為されたもので、2次元（開領域および閉領域）、3次元（開領域および閉領域）、および軸対称（開領域および閉領域）としてモデル化される領域の内、同一あるいは異なる領域が二つ以上連続して存在する場合の腐食・防食解析方法において、連

続して存在する二つ以上の異なる領域を連動して解析する方法を提供することを目的とするものである。

請求項 1 に記載の発明は、2 次元（開領域および閉領域）、3 次元（開領域および閉領域）および軸対称（開領域および閉領域）としてモデル化される 6 種類の領域の内、同一あるいは異なる種類の領域が二つ連続して存在する場合の腐食・防食解析方法において、全体を各領域に分割してそれぞれのモデル化（2 次元・3 次元および軸対称）に応じた要素分割を行い、それらの内の一領域を注目領域、他を非注目領域として、二つの領域の分割面は二つの領域に対して共通であるが、分割面上の位置が一致する各要素上においては、電流密度および電位は互いに等価であり、これら要素上における電流密度と電位の関係は未知であり、これら要素に対して電流密度又は電位を次々と値を変えて与え、前記非注目領域に対応する離散化した境界積分方程式をそれぞれ与えた電流密度または電位について解くことによって、未知である分割面上の電流密度と電位の関係を、分割面以外の非注目領域の要素上の既知である電流密度と電位の関係を集約することによって表わし、このようにして得られた分割面上の電流密度と電位の関係を分割面上の境界条件として注目領域の境界要素解析を行い、注目領域全体の電位及び電流密度分布を求め、次に、ここで得られた分割面上の電位又は電流密度を境界条件として非注目領域の境界要素解析を再び行うことによって領域全体の解析を連動して行うことを特徴とする腐食・防食解析方法である。

又、請求項 2 に記載の発明は、一つの前記注目領域に対して、二つ以上の非注目領域が連続して存在する場合に、請求項 1 に記載の方法で両分割面に対して電流密度と電位の関係を求め、これらを境界条件として

注目領域の解析を行い、注目領域全体の電位及び電流密度分布を求め、次に、ここで得られた分割面上の電位又は電流密度を境界条件として非注目領域の境界要素解析を再び行うことによって領域全体の解析を連動して行うことを特徴とするものである。

上述した本発明によれば、上記非注目領域に対応する離散化した境界積分方程式を未知である分割面上の電流密度と電位の関係を、分割面以外の非注目領域の要素上の既知である電流密度と電位の関係を集約することによって表わすことができる。これにより、非注目領域の分割面における電流密度と電位の関係を得ることができ、この分割面の関係から非注目領域を考慮した注目領域の解析が可能となる。従って、異種領域間を連続して比較的短時間で解析することが可能となる。

一つの注目領域に対して、二つ以上の非注目領域が連続して存在する場合においても、同様に適用が可能である。

#### 図面の簡単な説明

図 1 は電位又は電流密度分布を求めるための境界条件を説明する図である。

図 2 は領域分割を説明する図である。

図 3 は解析対象の一例としての海水ポンプの構造を示す図である。

図 4 は連続して存在する二つの異種領域を示す図である。

図 5 A 及び図 5 B は上記海水ポンプの領域分割を示す図である。

図 6 A 乃至図 6 C は上記海水ポンプの解析結果を示す図であり、図 6 A はポンプの形状（セグメント位置）を示し、図 6 B はポンプ内面の電位分布を示し、図 6 C はポンプ外面の電位分布を示す。

発明を実施するための最良の形態

図4は、領域 $\Omega$ を連続して存在する2種の異種領域 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ に分割した状態を示す。それぞれの境界要素 $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ は、それぞれ部分的に既知である。ここで、 $\Gamma_B$ は分割面における境界要素であり、領域 $\Omega_1$ から見ても領域 $\Omega_2$ から見ても、電位および電流密度は共通である。

被注目領域について通常の境界要素法を適用して得られる離散化した方程式は次式となる。

$$[H_2] \begin{Bmatrix} \phi^2 \\ \phi_I^2 \end{Bmatrix} = [G_2] \begin{Bmatrix} q^2 \\ q_I^2 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

ここで $\phi^2$ 、 $q^2$ は境界 $\Gamma_2$ における電位および電流密度、 $\phi_B^2$ 、 $q_B^2$ は領域 $\Omega_2$ から見た境界 $\Gamma_B$ における電位および電流密度である。 $[H_2]$ および $[G_2]$ は通常の境界要素法を適用して得られる係数マトリックスである。領域 $\Omega_2$ を囲む境界全体が $n$ 個の要素で構成されているとして、その $n$ 個の要素のうち境界 $\Gamma_2$ 上にある要素が $m$ 個、境界 $\Gamma_B$ 上にある要素が $l$ 個であるとする。

ここで、式(18)について、未知の境界節点量を左、既知の境界節点量を右に移行し、 $Ax=b$ という形にまとめ、 $\Gamma_2$ 上の境界条件を代入して整理すると次式となる。

ここで、 $x$ は未知電位もしくは電流密度からなるベクトル、 $b$ は既知の境界条件を代入した後の定数項ベクトル、 $A$ は $H$ 、 $G$ マトリックスおよび分極曲線の傾きによって決まる係数マトリックスである。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & \cdots & a_{1,n+1} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & \cdots & a_{n,n+1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1^2 \\ q_1^2 \\ \phi_1^2 \\ q_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_1 \end{Bmatrix}$$

(19)-

$\phi_1^2, q_1^2$  は境界  $\Gamma_2$  上の未知の電位および電流密度を表す。x は

$$m + 2 \ 1$$

行ベクトル、ベクトル b は n 行ベクトル、行列 A は

$$n \times (m + 2 \ 1)$$

の大きさの行列になる。

この行列 A を次のように分割する。

但し、

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & \cdots & a_{1,n+1} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & \cdots & a_{n,n+1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{22} & A_{21} \\ A_{12} & A_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1^2 \\ q_1^2 \\ \phi_1^2 \\ q_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_2 \\ B_1 \end{Bmatrix}$$

(20)

式 (20) の  $\phi_1^2$  および  $q_1^2$  を消去すると次式の  $\phi_1^2_B$  および  $q_1^2_B$  の関係が得られる。

$$\{[A_{11}] - [A_{12}][A_{22}^{-1}][A_{21}]\} \begin{Bmatrix} \phi_1^2 \\ q_1^2 \end{Bmatrix} = \{B_1\} - [A_{12}][A_{22}^{-1}]\{B_2\}$$

(21)

式(21)は境界 $\Gamma_B$ 上での境界節点量 $\phi^2_B$ と $q^2_B$ の関係を表す式となる。この関係式は非注目領域 $\Omega_2$ の影響を考慮にいたれた $\phi^2_B$ と $q^2_B$ の関係式であり、非注目領域の影響と等価な境界条件と考えられる。したがってこれを $\Gamma_B$ の境界条件として与えれば、非注目領域の影響を考慮に入れて注目領域を解析することが可能になる。即ち、非注目領域の解析によって得られた $\Gamma_B$ 上での電位あるいは電流密度を境界条件として注目領域の解析を行う。更に得られた分割面の電位あるいは電流密度に基づいて非注目領域の解析を行うことで、全領域の解析が完了する。

解析対象は、図3に示すような口径200mm、長さ6000mmの立軸ポンプである。ポンプを図5A及び図5Bに示すようにポンプ内部15、16および外部17に分割し、内面は、部材が複雑に入り組み流路が螺旋状で複雑な3次元形状のガイドケーシング部15と、軸対称でモデル化が可能なコラムパイプ部16とに分割する。以上のように分割した3つの領域はそれぞれ、ポンプ外面は軸対称開領域、ガイドケーシング内面は3次元閉領域、コラムパイプ内面は軸対称閉領域として扱った。ガイドケーシング内面は7枚の螺旋形状のガイドベーンによって7つの流路に仕切られている。これらは互いに対称であるため、その内一つを取り出して3次元要素分割を行った。

まず、ポンプ外面およびコラムパイプ内面とガイドケーシングとの境界面 $\Gamma_a$ および $\Gamma_b$ での電位 $V_s$ 、電流密度 $q$ の関係を求めるため、ポンプ外面およびコラムパイプ内面を非注目領域としてこれらに対して境界要素解析を行った。前者に対しては軸対称開領域解析、後者に対しては軸対称閉領域解析を行った。

得られた電流密度と電位の関係を境界条件としてガイドケーシング部



(注目領域)の3次元閉領域解析を行った。この解析によって得られた境界面 $\Gamma a$ および $\Gamma b$ での電流密度を境界条件として、再びポンプ外面およびコラムパイプ内面の解析を行い、全解析を終了した。解析結果の一例としてポンプ内外面の電位分布を図6 A乃至図6 Cに示す。

図6 Aは、解析対象のポンプの形状(セグメント位置)を示すもので、横軸が半径方向位置を示し、縦軸が軸方向位置を示す。図6 Bはポンプ内部の電位分布を示し、図6 Cはポンプ外部の電位分布を示す。図3に示す犠牲陽極11a, 11b, 11cの位置で、ポンプ内面の電位は著しく負となり、犠牲陽極以外の部分においても、 $-0.4$  [V]程度であることが判る。これは、通常ステンレスポンプでは海水中においては、犠牲陽極が用いられない場合は、0 [V]前後となるのに対して、犠牲陽極の配置による防食効果が著しいことが判る。この点は、ポンプ外面においても同様である。また、図中 $\Gamma a$ と $\Gamma b$ との間が、注目領域(ガイドケーシング部)であり、それ以外が非注目領域であるが、これらの分割面 $\Gamma a$ ,  $\Gamma b$ において、電位の分布が連続している。これは、上述した異種領域間の連動解析によって始めて、異種領域間で連続した解析結果が得られることが判る。

尚、この実施例は本発明の一実施形態を示すもので、本発明の趣旨を逸脱することなく種々の変形実施例が可能なことは勿論である。

これまで、2次元(開領域および閉領域)、3次元(開領域および閉領域)および軸対称(開領域および閉領域)としてモデル化される6種類の別々の領域が、二つ以上連続して存在するような複雑な場の解析は、それぞれ別々に解析せざるを得なかったが、本発明による方法により全体を連動させて解析することが可能になった。

例えば、立軸ポンプのポンプ内外面は互いに電気化学的に影響し合っているにもかかわらず、これまでは別々に解析せざるを得ず、腐食・防食に関する正確な解析ができなかった。本発明による方法によりポンプ内外面を連動させて、比較的短時間で解析することが可能になった、また、従来はポンプ内面全体を3次元閉領域モデルで解析していたが、簡単な形状のコラムパイプ内面は軸対称モデルで解析することが可能になり、要素分割が著しく容易になった。

また、3次元領域と軸対称領域が連続して存在する場合、軸対称でモデル化できる領域の判定を正確に行うことができなかったが、上述したように明確に区分けが可能であり、容易に境界領域における電位分布、電流密度分布の解析が可能となり、これにより有効な腐食・防食対策を行える。

#### 産業上の利用の可能性

本発明は、金属の腐食・防食のコンピュータによる解析方法に関するものであり、例えば海水中・水中・土壤中に設置されるポンプ等の各種機器の腐食・防食の予測に利用可能である。また、金属の腐食・防食問題以外にも、メッキ、電池、電解槽など、マクロ的なアノードとカソードが電解質を介して存在し、電位場を形成する系に対して、そのコンピュータによるシミュレーションに利用することができる。

## 請求の範囲

1. 2次元（開領域および閉領域）、3次元（開領域および閉領域）および軸対称（開領域および閉領域）としてモデル化される6種類の領域の内、同一あるいは異なる種類の領域が二つ連続して存在する場合の腐食・防食解析方法において、

全体を各領域に分割してそれぞれのモデル化（2次元・3次元および軸対称）に応じた要素分割を行い、それらの内の一領域を注目領域、他を非注目領域として、

二つの領域の分割面は二つの領域に対して共通であるが、分割面上の位置が一致する各要素上においては、電流密度および電位は互いに等価であり、これら要素上における電流密度と電位の関係は未知であり、これら要素に対して電流密度又は電位を次々と値を変えて与え、前記非注目領域に対応する離散化した境界積分方程式をそれぞれ与えた電流密度または電位について解くことによって、未知である分割面上の電流密度と電位の関係を、分割面以外の非注目領域の要素上の既知である電流密度と電位の関係を集約することによって表わし、このようにして得られた分割面上の電流密度と電位の関係を分割面上の境界条件として注目領域の境界要素解析を行い、注目領域全体の電位及び電流密度分布を求め、次に、ここで得られた分割面上の電位又は電流密度を境界条件として非注目領域の境界要素解析を再び行うことによって領域全体の解析を連動して行うことを特徴とする腐食・防食解析方法。

2. 一つの前記注目領域に対して、二つ以上の非注目領域が連続して存

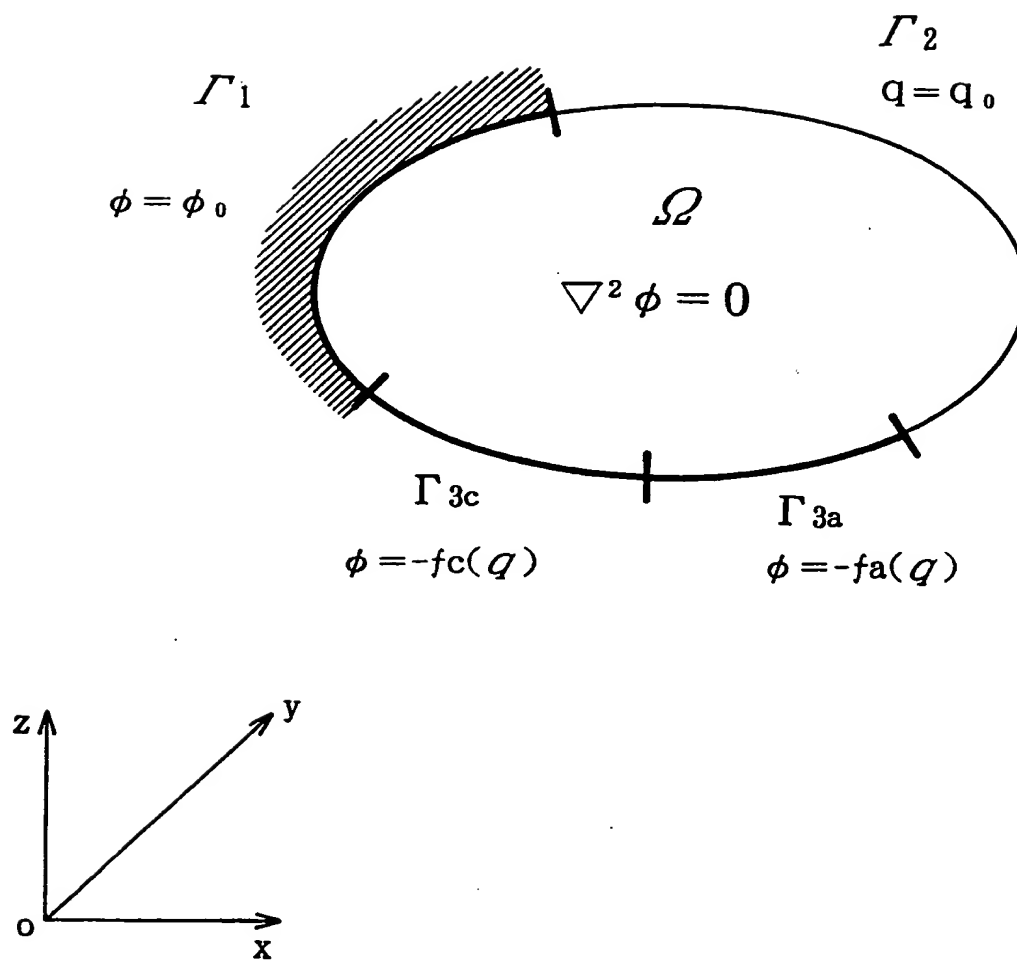
在する場合に、請求項 1 に記載の方法で両分割面に対して電流密度と電位の関係を求め、これらを境界条件として注目領域の解析を行い、注目領域全体の電位及び電流密度分布を求め、次に、ここで得られた分割面上の電位又は電流密度を境界条件として非注目領域の境界要素解析を再び行うことによって領域全体の解析を連動して行うことを特徴とする腐食・防食解析方法。

3. 前記注目領域をポンプのガイドケーシング内部の 3 次元形状の閉領域とし、非注目領域がこれに連続して存在するポンプ内周面のコラムパイプ部の軸対称閉領域と、ポンプ外面の軸対称開領域としたことを特徴とする請求項 2 に記載のポンプの腐食・防食解析方法。

4. 前記ポンプの各領域の一部又は全部には陽極を配置して、該陽極による防食効果を評価することを特徴とする請求項 3 に記載のポンプの腐食・防食解析方法。

1/6

FIG. 1

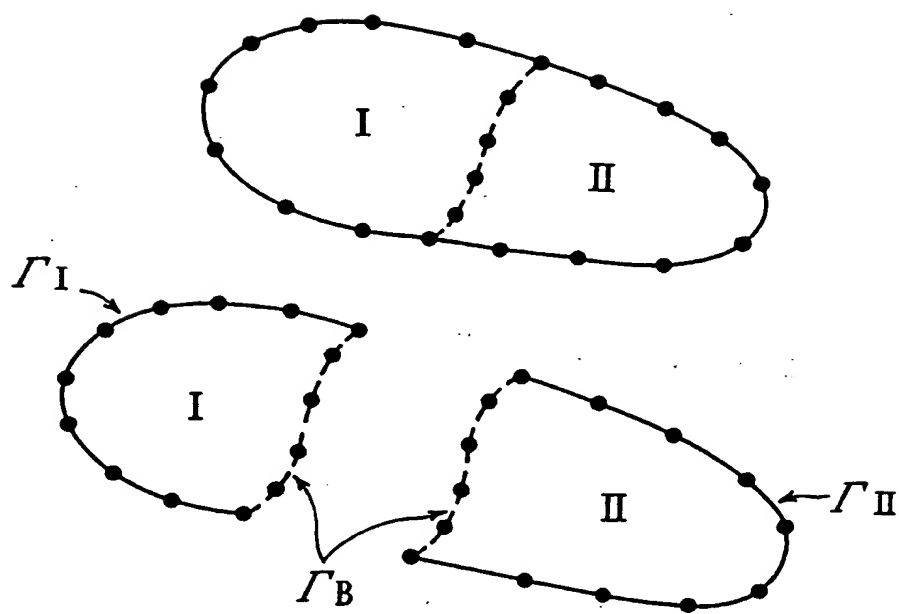


**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

2/6

FIG. 2

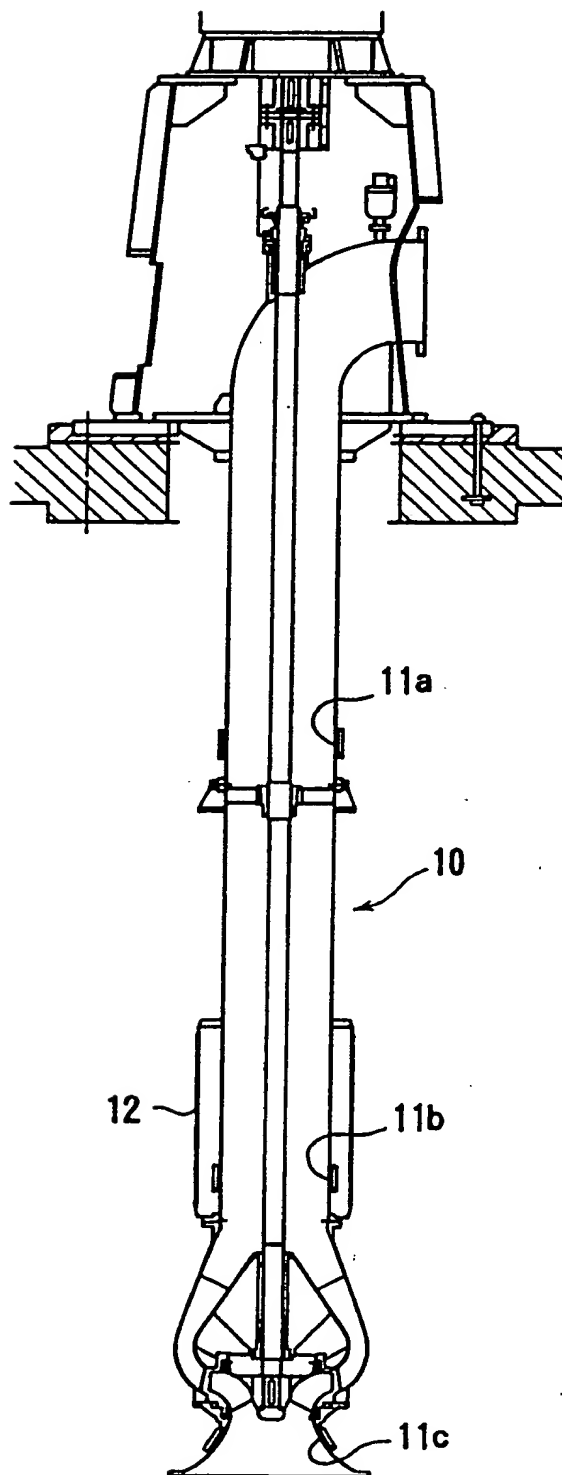


**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



3/6

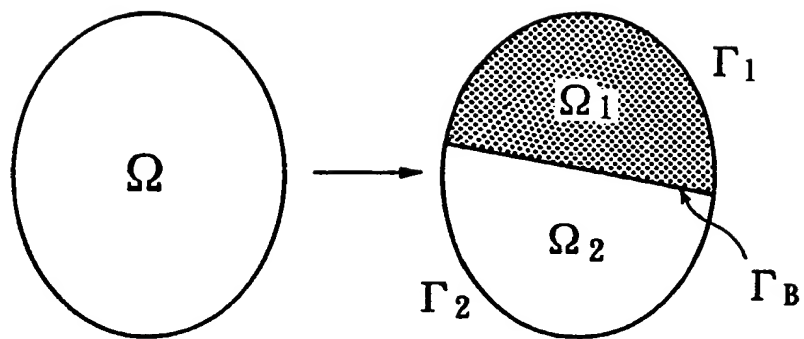
FIG. 3



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

4/6

FIG. 4



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

FIG. 5A

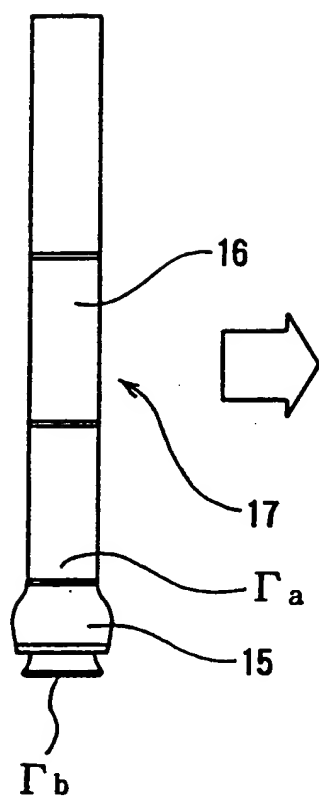
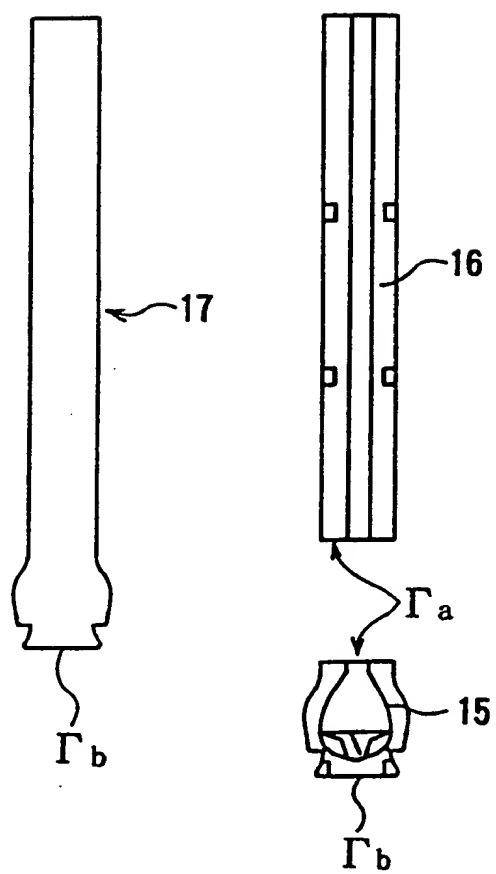


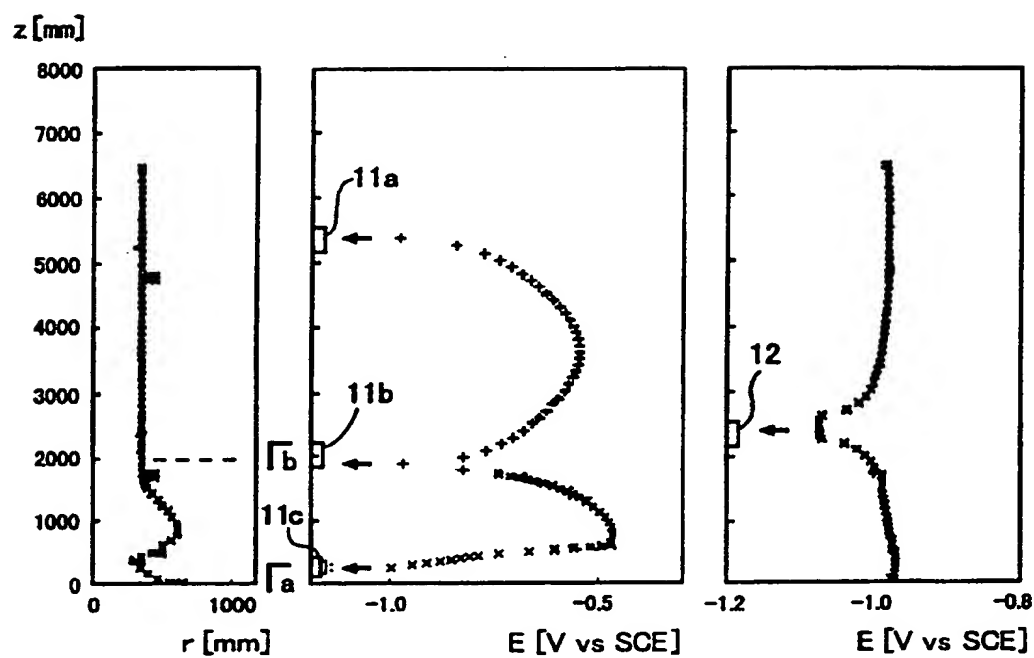
FIG. 5B



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

6/6

FIG. 6A      FIG. 6B      FIG. 6C



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP99/05110

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
Int.Cl<sup>6</sup> G01N27/26

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>6</sup> G01N27/26

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1926-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-1999
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-1999	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-1999

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Materials and Environment, No. 46(6), pages 378-383, Shadan Hojin Fushoku Boshoku Kyokai, 15 June, 1997 (15.06.97)	1-4
A	Surface Technology, No. 48(9), pages 900-905, Shadan Hojin Hyomen Gijutsu Kyokai, 1997	1-4
A	Ebara Jiho, No. 171, pages 3-8, April, 1996	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 09 December, 1999 (09.12.99)	Date of mailing of the international search report 21 December, 1999 (21.12.99)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  
Int. Cl<sup>o</sup> G01N27/26

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))  
Int. Cl<sup>o</sup> G01N27/26

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年  
日本国公開実用新案公報 1971-1999年  
日本国登録実用新案公報 1994-1999年  
日本国実用新案登録公報 1996-1999年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  
JICST科学技術文献ファイル

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	材料と環境, 46(6), p. 378-383, (社団法人腐食防食協会), 15. 6月. 1997(15. 06. 97)	1-4
A	表面技術, 48(9), p. 900-905, (社団法人表面技術協会), 1997(. . 97)	1-4
A	エバラ時報, 171, p. 3-8, 4. 1996(. 04. 96)	1-4

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09. 12. 99

国際調査報告の発送日

21.12.99

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

宮澤 浩



2 J

9407

電話番号 03-3581-1101 内線 3252

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**